

3次元点群からのマルチスケール特徴抽出法に関する検討

早田 越^{1,a)} 岩切 宗利^{1,b)}

概要: 3D センシング技術の進展と普及により、取得した大規模な3次元点群から空間情報を分析し、理解する手法の需要が高まっている。3次元点群に含まれるオブジェクトの特徴を抽出する既存手法として、注目点を中心とした評価範囲の違いによる法線ベクトルの変化(差分)を求める Difference of Normals (DoN)[1] が存在する。我々は、DoN の基本性能向上を目的とし、評価する局所点群の重複を除去する手法、外周を重複させる手法、曲率の変化を求める手法について検討した。本報告は、これらの手法を用いて点群に特徴付けした結果から得た各手法の特性に関する理論的考察を示したものである。

1. はじめに

2010年に登場した Kinect[2]等の3Dセンサーの普及により、3次元点群を処理し、それを活用する機会が増えている。点群の結合[3]による大規模な3次元点群の生成も、個人レベルで可能となり、建築・土木分野や文化財保護利用等、幅広い分野に活用されつつある[4]。最近では、大規模な3次元点群から空間情報を処理分析し、理解する手法の需要が高まっている[5]。

3次元点群の処理技術は、物体認識[6]や特徴抽出[7]、セグメンテーション[1]、レジストレーション[8]等、多岐にわたっている。中でも、点群を分割するセグメンテーション技術は、3次元点群を処理する上で重要な技術である。その代表的な手法として、入力点群にスケールスペース処理を行う手法[9]、点同士の距離をグラフ化する手法[10]等が検討されている。特に、注目点を中心とした評価範囲の違いによる法線ベクトルの変化(差分)を求める Difference of Normals (DoN)は、約48万点の大規模な点群から人や信号灯などのクラスターへ8秒以内に切り分けるなど、他のセグメンテーション手法よりも計算量が少なく、大規模な点群の高速処理に適している[1]。その考え方に基づくマルチスケールなスカラー特徴量算出法は、物体認識の分野など、幅広い応用の可能性を有している[6]。我々は、DoNの考え方を参考に、その特徴抽出能力を向上できる手法の開発に取り組んでいる。本報告では、DoNで処理する評価対象の範囲や評価手法に関して5つの手法を提案し、これらの手法により点群を特徴付けした結果か

ら、それぞれの特性について検討した結果を示す。

2. Difference of Normals(DoN)

Ioannou等が提案したセグメンテーションオペレータ DoNは、法線ベクトルの差分に注目した手法である。注目点から半径 r_{ds} と $r_{dl}(r_{ds} < r_{dl})$ の球内に存在する点群それぞれから、主成分分析によって法線ベクトルを算出し、それらの差分ベクトルの大きさを特徴量として利用する(図2)。

2.1 点群の主成分分析

Jutziらは、注目点近傍の局所点群に対し主成分分析(Principal Component Analysis=PCA)を行い、局所点群の形状によって固有値の値が変化することを示した。[11]局所点群に対して主成分分析を行うことにより、第1~3主成分及びそれぞれに対応する主成分方向のベクトルおよび固有値 $\{\lambda_0(n), \lambda_1(n), \lambda_2(n)\}$ ($\lambda_0(n) \leq \lambda_1(n) \leq \lambda_2(n)$) が得られ、最小固有値 $\lambda_2(n)$ に対応する正規化された固有ベクトルは点の法線ベクトルとして定義される[12]。これを図示したものが図1である。

主成分分析における第1主成分とは分散最大方向を指す。これは、点密度等の条件にもよるが、点群の各点を相互に結んだ際に最大距離を取る線と同方向の軸を意味する。そして、この軸と平行な辺を底面の1辺とする、対象点群を内包する最小の直方体を想定した場合、残りの直交2辺に平行な軸が、長い順に第2主成分方向、第3主成分方向となる。つまり、各主成分方向は、対象点群を内包する直方体の縦・横・高さに対応し、固有値も各辺の長さに対応されると例えることができる。

¹ 防衛大学校情報工学科
National Defense Academy

a) em53035@nda.ac.jp

b) iwak@nda.ac.jp

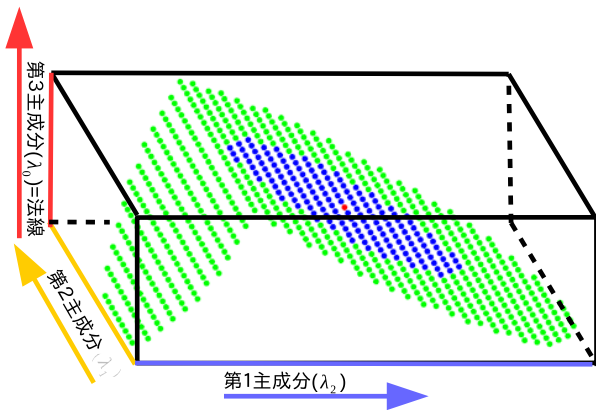


図1 点群の主成分分析イメージ

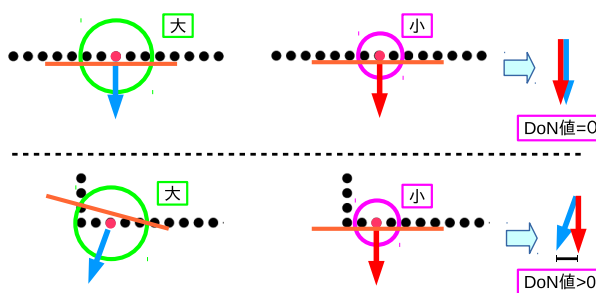


図2 DoN イメージ

2.2 法線ベクトル差分による DoN 特徴量算出

PCAによって得られた第3主成分の固有ベクトルは当該局所点群の法線となる。DoNでは、注目点に対して大小2つの球状の範囲(内球・外球)にある点群をそれぞれ局所点群とし、法線を算出する。この2法線の差分ベクトルの大きさがDoNの特徴量となる。図2はDoN値算出のイメージである。図2上段の場合、内球・外球が共に同一平面をカバーしているため、法線も等しくなり、差分ベクトルの大きさは0となる。一方、図2下段の場合、内球は平面のみをカバーしているものの、外球は屈折した面までカバーしているため、PCAで算出される法線は内球とは異なる方向を向き、差分ベクトルの大きさは0より大きな値を持つ。内球と外球の法線ベクトルが異なる方向を向くほど、差分ベクトルの大きさは大きくなる。このように、外球と内球がカバーする局所点群の形状が異なるほど値が大きくなるため、DoN特徴量は形状の変化を定量的に評価する指標であると言える。

3. 提案手法

DoNはマルチスケールで高速処理可能なスカラー特徴量である。だが、法線を計算する評価範囲である内球と外球は、図4(1)のように内球部分が外球と重複している。DoNを内球と外球の形状の相違を評価する手法であると考えた場合、この重複は冗長とみなすことができる。また、DoN特徴量は法線ベクトル間の差分値のみで表現されており、

相対性が強い[6]。

そこで、DoNの考え方をもとに評価範囲を変更した2手法について提案する。そして、DoN特徴量に代わる評価手法として、曲率を用いた3手法も提案する。

3.1 DDoN(Donuts DoN)

DoNの内球と外球には重複部分があり、形状の変化を評価するにあたっては冗長であると考えられる。そこで、図4(2)のように、DoNの外球から内球との重複部分を除去し、外球をドーナツ状(実際には中空球状)にしたDDoNを提案した。同一点群を比較対象から外すことにより、形状変化に対する鋭敏性向上を期待した。

3.2 RDoN(Ring DoN)

4(1)から、DoNの評価範囲は、内球部分が重複し、外球から内球部分をくりぬいた場所(外周部)が差分となっていることがわかる。これは、内球部を基準とし、これに対する外周部の形状変化を計測する手法であると言える。そこで、4(3)のように、重複部と差分部をDoNとは反転させたRDoNを提案した。これにより、外周部を基準面とし、内球部の形状変化に反応すると考えられる。

3.3 曲率

DoNで用いられる、PCAによる法線算出法は、どのような局所点群からも法線を求めることができるという利点を持つ。しかし、本来平面に直行するはずの法線が、平面でない局所点群からも算出できるということは、あくまでPCAで得られた第1・2主成分を軸とする平面を便宜的に割り当てたに過ぎず、必ずしも形状を正しく評価できているとは言えない。例として、注目点を赤点、外球・内球を半径違いの円、法線ベクトルを色違いの矢印で表現した図3(a)を示す。図3(a)において、内球と外球それぞれがカバーする局所点群の形状は明らかに異なる。しかし、どちらも法線は等しいため、DoN特徴量は0となり、内球と外球がカバーする局所点群の形状に違いはないと判断されてしまう。そこで、第3主成分だけでなく、全ての主成分の固有値を使用して式1のとおり算出される曲率 χ を、形状変化の評価尺度として用いる。

$$\chi = \frac{\lambda_0}{(\lambda_0 + \lambda_1 + \lambda_2)} \quad (1)$$

DoNでは法線、すなわち第3主成分しか評価しなかったが、曲率は第3主成分の固有値を第1～第3主成分の固有値の総和で正規化している。つまり、曲率は、図1で示したとおり、局所点群を内包する直方体の大きさに対する厚みの割合であり、大まかであるとはいえ、形状そのものを評価していると言える。以上を踏まえた上で、図3(a)を曲率で評価した図3(b)を示す。図3(b)において、内球・外

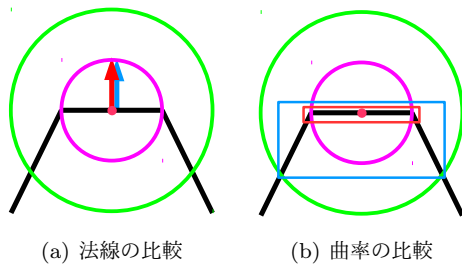


図 3 DoN では評価困難な形状

球の局所点群を赤・青の四角形で囲んでいる．四角形の底辺を第1主成分とみなし，第2主成分は奥行き，第3主成分は高さとする．内球の局所点群は厚みが無いため，その曲率 χ_s は0となるが，外球の局所点群は厚みがあるため，その曲率 χ_l は0より大きくなる．今回の提案手法では，内外球の局所点群の曲率の差を求めるため，DoN では形状変化なしと判断される図3のような点についても，形状変化ありと判断でき，DoN よりも形状変化に対して正確な反応が期待できる．

3.4 DoC(Difference of Curvatures)

DoC は，内球と外球がそれぞれカバーする局所点群の曲率の差分である DoC 特徴量 $\Delta\chi$ を求める手法であり， $\Delta\chi$ は式2により求まる．なお，曲率値は χ ，各固有値は $\lambda_0 \sim \lambda_2$ で表し，外球・内球の違いは，下付き添字の l, s で示す．

$$\Delta\chi = |\chi_l - \chi_s| = \left| \frac{\lambda_{0s}}{(\lambda_{0s} + \lambda_{1s} + \lambda_{2s})} - \frac{\lambda_{0l}}{(\lambda_{0l} + \lambda_{1l} + \lambda_{2l})} \right| \quad (2)$$

3.5 DDoC(Donuts DoC)

DDoC は，DDoN 同様，重複部を排することで，DoC の反応をより鋭敏にすることを目的とした手法である．特に，3面角頂点において，内球の点群と外球の点群の形状に大きな違いが生じるため，形状をより正確に捉えることができる曲率を用いる本手法は，DDoN よりも強い反応を示すことが期待される．

3.6 RDoC(Ring DoC)

RDoC は，RDoN 同様，外周部を重複させ，注目点付近の形状変化に反応させることを目的とした手法である．DDoC 同様の理由から，3面各頂点において，RDoC よりも強い反応を示すことが期待される．さらに，DDoC と違い内球と外球の点群形状の高さが異なるため，3面角頂点において DDoC よりも強い反応を示すことも想定される．

3.7 評価方法

提案手法の評価範囲および重複部位・差分部位を色の有無で表現した一覧を，図4に示す．なお，DDoN および

番号	手法	外球	内球	重複 (基準平面)	差分 (外れ値観測対象)
(1)	DoN				
	DoC				
(2)	DDoN				
	DDoC				
(3)	RDoN				
	RDoC				

図 4 評価範囲比較図

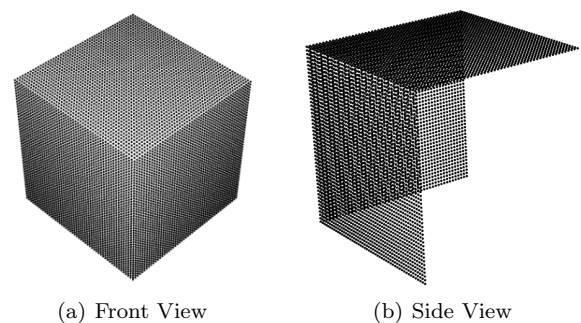


図 5 実験モデル

表 1 実験データの諸元

点の総数	モデルのサイズ [mm]	解像度 [mm]
7351	100x100x100	2.1

DDoC には重複部位が無いいため，重複および差分の項目が空欄となっている．

4. 実験結果および考察

4.1 実験環境

提案手法の性能評価には，数値シミュレーションで得た図5の点群を用いた．その諸元は表1のとおりである．本実験では，3D 距離センサによる一方向からの取得点群を想定した．実験モデルは1辺長 10cm の正方形3面のみから構成され，オクルージョン領域に点群は存在しないことに注意する．実験モデルにおいて，3面が交差する角を3面角，2面が交差する角を2面角と呼ぶ．

従来手法との比較には，DoN 法 [1] を用いた．いずれの手法も，図5の点群に対し，法線ベクトルの算出半径を $(r_{ds}, r_{dl}) = (1.5cm, 3.0cm)$ として適用した．

4.2 特徴付け

全ての点について，DoN 特徴量 Δn または DoC 特徴量 Δc を算出した．得られた Δn または Δc を正規化し，最

小値を青，最大値を赤とするヒートマップによって特徴付けを行い，各手法の反応を視覚的に捉え，考察することで，基本性能を明らかにした．実験の結果，図6のヒートマップが得られた．

4.3 DoN 法による実験結果

図6(a) から，DoN は2面角周辺をなぞるように反応を示すことがわかった．このことから，DoN は形状変化部分の周辺をなぞるようにセグメンテーションできることが確認できた．

4.4 DDoN による実験結果

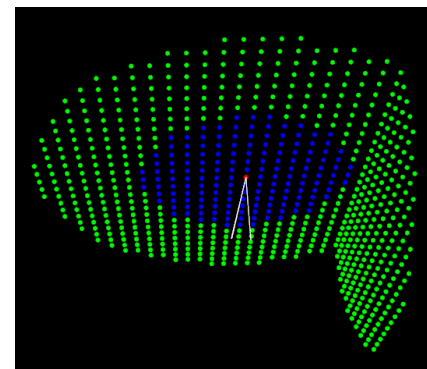
図6(b) から，DDoN はオクルージョンに接する2面角周辺に強く反応を示すことがわかった．その原因について，図7～図9を用いて説明する．なお，図中の赤点は注目点，白線は法線を表している．図7(a)，図8(a)，図9(a)は，内球の局所点群を青，DDoN 外球の局所点群を緑で表現し，内球及びDoN/DDoNの外球それぞれの法線を同時に表示した図である．これらから，内球の法線はいずれも内球の局所点群がなす平面に対して垂直に伸びていることがわかった．図7(b)と図7(c)，図8(b)と図8(c)，図9(b)と図9(c)の比較から，いずれのケースにおいても，内球の局所点群がなす平面以外の面から受ける影響は，DoNもDDoNもほぼ同程度であることがわかった．しかし，図9(b)，図9(c)から，オクルージョンに接する2面角付近において，DDoNの外球部法線は，DoNのそれよりもオクルージョンからの影響をより大きく受けていることがわかった．以上から，DDoNはオクルージョンの影響を強く受けるため，DoNと比較すると，3面角・2面角・オクルージョンに接する2面角それぞれの周辺に，強度の異なる反応を示している点の特徴であるとわかった．

4.5 RDoN による実験結果

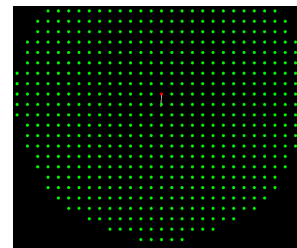
図6(c) から，RDoN はオクルージョンに接する2面角に強く反応することがわかった．図7，図8のとおり，DoNおよびDDoNの外球部(RDoNの内球と外球に相当)では，2面角及び3面角周辺の法線がほぼ変わらないため，反応が極めて弱くなっていた．一方，オクルージョンに接した2面角周辺においては，図9のとおりオクルージョンの影響から法線に明確な差が出るため，強い反応を示した．DoNと比較すると，オクルージョンに接する2面角周辺にのみ反応する点がRDoNの特徴であるとわかった．

4.6 DoC による実験結果

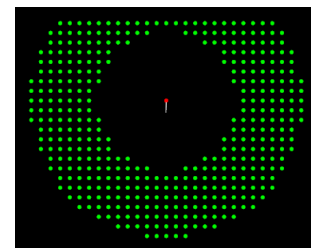
図6(d) から，DoC は2面角をなぞるように反応し，3面角及びオクルージョンに接する2面角周辺で反応が強まることがわかった．曲率はオブジェクトのサイズに応じた厚みを評価する指標であるため，例えば3面角頂点のような，



(a) 全法線

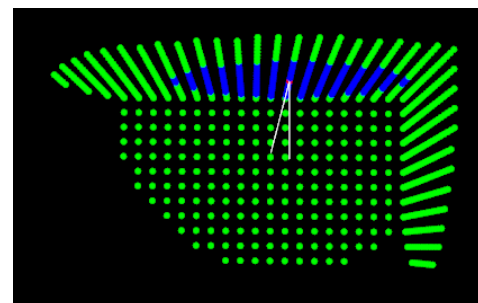


(b) DoN 外球

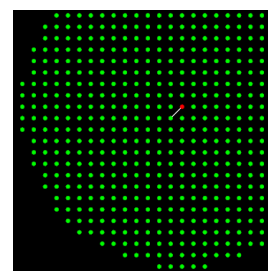


(c) DDoN 外球

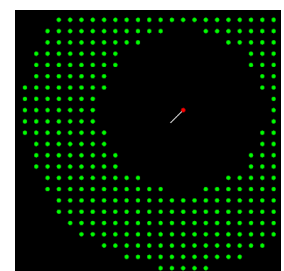
図7 2面角法線比較



(a) 全法線



(b) DoN 外球



(c) DDoN 外球

図8 3面角法線比較

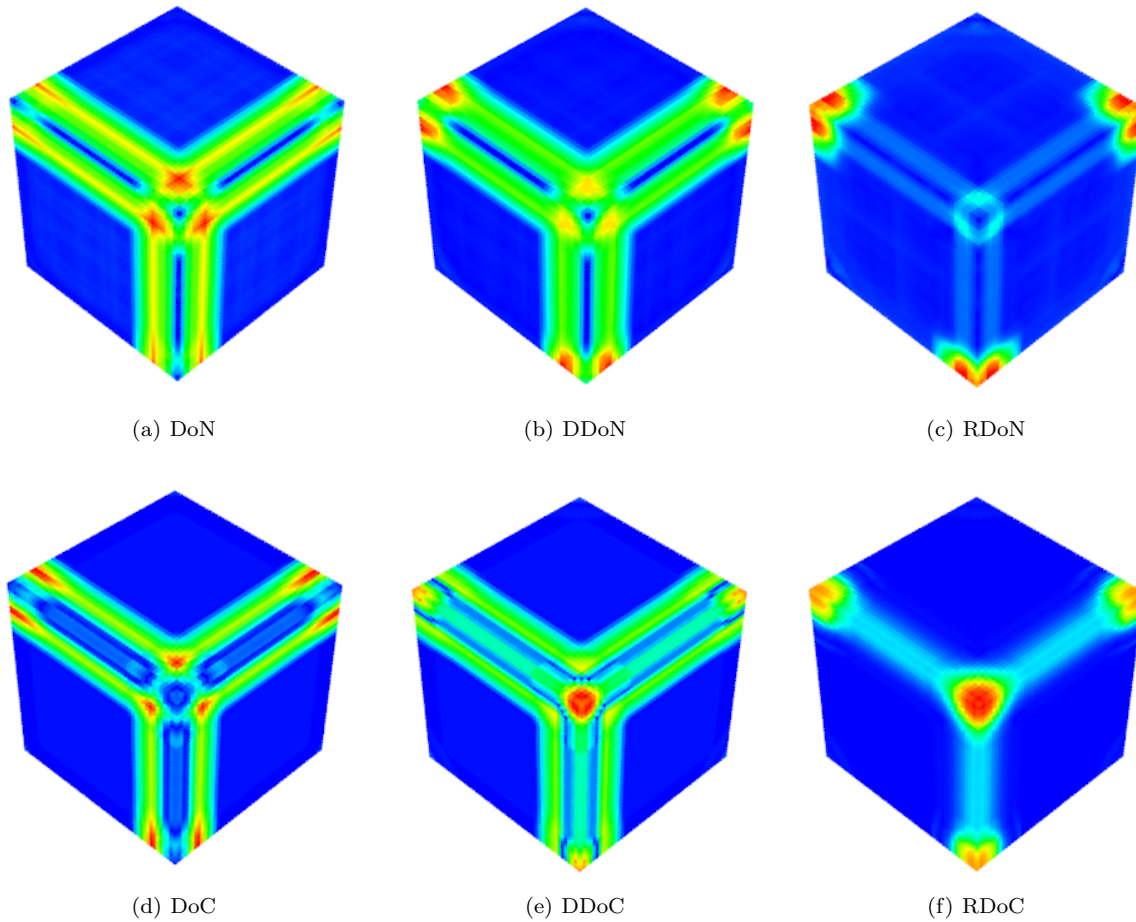


図 6 実験結果

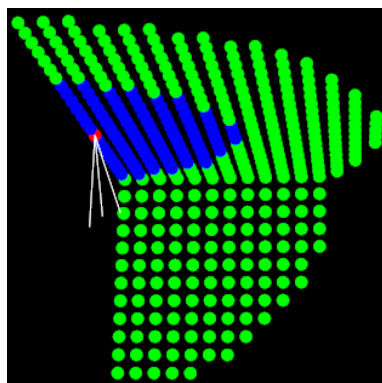
注目点において対称性を持つ位置では、内球部分と外球部分では相似な立体となり、曲率に変化が生じにくい。そのため、内球と外球の曲率に大きな変化が生じるのは外周部に形状変化が生じた場合のみとなり、DoN とほぼ同じ条件下で似たような反応を示した。

4.7 DDoC による実験結果

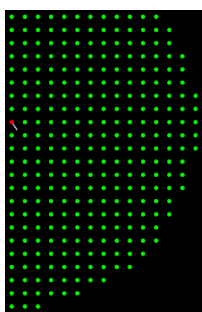
図 6(e) から、DDoC は 3 面角自体に強く反応することがわかった。また、2 面角自体にもわずかに反応し、オクルージョンに接する部分では、その反応が強まることもわかった。DDoC では、外球と内球の局所点群の形状が相似ではなくなったため、面が交差する部分に直接曲率の差が生じやすくなった。特に 3 面角においては、内球・外球における点群形状が異なり、高さは同じだが底面 2 辺の和が等しくないため、外球の点群の高さの比率が相対的に低くなり、曲率値の差が大きくなった。DoN と比較すると、3 面角に直接強く反応する点が DDoC の特徴であるとわかった。

4.8 RDoC による実験結果

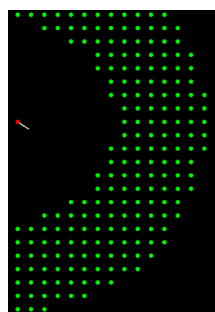
図 6(f) から、RDoC はオクルージョンに接する 2 面角及び 3 面角に強く反応することがわかった。どちらも DDoC 同様、外球と内球の局所点群の形状が相似ではないことに



(a) 全法線



(b) DoN 外球



(c) DDoN 外球

図 9 2 面角 (オクルージョン付近) 法線比較

よる反応であるが, RDoCの方が第3主成分の値が大きい
ため, 両者とも DDoC よりも強い反応を示していることが
わかる. DoN と比較すると, 3 面角及びオクルージョンに
接する 2 面角に, 直接強い反応を示す点が DDoC の特徴で
あるとわかった.

5. おわりに

本報告では, DoN の評価対象や範囲を変化させた複数の
手法を提案し, それぞれの特性について検討した結果を示
した. DoN は面同士が交差する, すなわち形状が変化する
エッジの周辺に反応するため, セグメンテーション手法と
して優れていた. DoN の評価範囲及び評価対象を変更し
た 5 手法を, 3 面で構成されるオブジェクトに適用した結
果, 評価範囲や評価対象の組み合わせを変更することで,
反応箇所や反応強度が大きく変わることがわかった.

参考文献

- [1] Y. Ioannou, B. Taati, R. Harrap, M. Greenspan: "Difference of Normals as a Multi-Scale Operator in Unorganized Point Cloud", 3D Imaging, Modeling, Processing, Visualization and Transmission, pp.501-508(2012).
- [2] Microsoft: "Kinect", <http://www.xbox.com/ja-JP/kinect>(最終確認: 2015/7/2)
- [3] Microsoft: "Kinect Fusion", <https://msdn.microsoft.com/en-us/library/dn188670.aspx>(最終確認: 2015/7/2)
- [4] 金井 理, 増田 宏, 小野里 雅彦, 河村 幸二, 伊達 宏昭: "サイバーフィールド構築技術の現状と展望", 精密工学会誌 Vol. 76 No. 10, pp.1121-1124 (2010).
- [5] 建設通信新聞: "需要拡大するレーザー計測", 建設ハンドブック 2013 年版 第 10 章-3, <http://www.kensetsunews.com/?p=20090>(最終確認: 2015/7/2)
- [6] 永瀬 誠信, 秋月 秀一, 橋本 学: "CCDoN: バラ積み部品の高速・高信頼な 6 自由度位置姿勢推定のための局所特徴量", 精密工学会誌 Vol.80 No. 12, pp.1138-1143 (2014)
- [7] 早田 昶, 堀田 富宝, 岩切 宗利: "ND-PCA 法による 3 次元点群への特徴付け", 第 2 1 回画像センシングシンポジウム ダイジェスト集, IS1-17(2015)
- [8] Kazuma Uenishi, Munetoshi Iwakiri: "Virtual Key-point Detector for 3D Registration",
- [9] K. Uenishi and M. Iwakiri: "Virtual Feature Point Extraction from Polyhedral Structure", Proceedings of IEEE International Symposium on Intelligent Signal Processing and Communication Systems, pp. 519-524 (2013).
- [10] A. Golovinskiy and T. Funkhouser: "Min-cut based segmentation of point clouds", 2009 IEEE 12th International Conference on Computer Vision Workshops ICCV Workshops, 150:39-46(2009).
- [11] B. Jutzi, H. Gross: "Nearest neighbour classification on laser point clouds to gain object structures from buildings" The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences 38, 2009.
- [12] M. Pauly, M. Gross, L. Kobbelt: "Efficient Simplification of Point-Sampled Surfaces", Proceedings of the conference on Visualization '02, pp.163-170(2002).
- [13] R. B. Rusu, S. Cousins: "3D is here: Point Cloud

Library(PCL)", Robotics and Automation, pp.1-4(2011).